MODELISATION 3D DE PROBLEMES COUPLES MAGNETO-THERMIQUES PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS APPLICATION AU TRAITEMENT THERMIQUE PAR INDUCTION

J.M. DEDULLE, V. POULBOT, J. MORANDINI

DT2i
8 CHEMIN DES PRELES - ZIRST
38240 MEYLAN - FRANCE

La mise au point des procédés industriels nécessite de plus en plus l'apport de la simulation numérique. Les procédés réels, tels que le traitement thermique par induction, font en général intervenir plusieurs phénomènes physiques, qui doivent être pris en compte de façon couplée dans la modélisation.
L'objet de cet article est de présenter différents modèles magnéto-thermiques tridimensionnels implémentés dans le logiciel FLUX-EXPERT [1]. Deux exemples d'applications industriels sont présentées.

The technological advance of industrial processes require more and more numerical simulation and computer assisted design. The electromagnetic field and thermal coupled problems have been taken into account.
In this paper, we describe differents magneto-thermal models developped in FLUX-EXPERT package [1].
We detail industrial applications such as induction quenching and a pseudo-transverse flux induction process.

INTRODUCTION

Grâce aux recherches des vingt dernières années, de nombreux procédés industriels nécessitant des opérations de chauffage font appel à des dispositifs de chauffage par induction. Les applications sont très nombreuses, qu'il s'agisse de traitement thermique de surface, de forgeage, de collage par polymérisation ou encore d'applications domotiques et ménagères. Les procédés de chauffage par induction intéressent toute la chaîne industrielle, de la transformation de matière première aux produits finis.
Cependant, la mise au point d'installations de chauffage par induction n'est pas chose aisée. Les inducteurs sont encore bien souvent dimensionnés de façon empirique, sur la base de l'expérience acquise par le constructeur, et le profil de puissance à injecter dans la pièce, obtenu par essais successifs. Les campagnes d'essais sont cependant longues et coûteuses.
Aussi la conception assistée par ordinateur, basée sur la simulation numérique des phénomènes magnétiques et thermiques mis en jeu, présente des avantages certains en termes de coût, de délai et d'optimisation, pour la mise au point des procédés de chauffage par induction. La prédiction du comportement magnéto-thermique de l'ensemble pièce à chauffer - inducteur permet à la fois l'optimisation du dimensionnement électrique et mécanique de l'inducteur, ainsi que du profil de puissance nécessaire au traitement de la pièce [2].
La distribution de température est quant à elle, un facteur clé de prédiction de l'efficacité du traitement thermique**.**
Les propriétés physiques des matériaux sont fortement dépendantes de la température. Pour des problèmes non linéaires à géométrie complexe, la méthode des éléments finis c'est avérée très efficace. Pour le calcul numérique, différent choix de des variables d'état, aboutissant à des formulations différentes, sont possibles. Les formulations en potentiels en particulier, sont bien adaptées aux éléments finis nodaux, principalement utilisés dans FLUX-EXPERT. De plus, elles présentent de nombreux avantages dans le cadre du chauffage par induction :

. elles permettent d'imposer des sources électriques proches des procédés réels (densité de courant, différence de potentiels)
. la réaction d'induit est implicitement pris en compte
. la grandeur utile pour le chauffage, soit la densité de puissance induite, est directement proportionnelle à la variable d'état, et bénéficie ainsi d'un maximum de précision.

Nous exposerons les différentes formulations 2D et 3D utilisables. Dans le cas de procédé à géométrie tridimensionnelle, mais dans lequel la pièce à traiter présente une symétrie de révolution, nous avons développés une technique originale de modélisation dite à "courants mixtes" qui donne de bons résultats, pour des coûts de calcul extrêmement réduits.
Ces différentes techniques sont appliquées pour exemple, au traitement thermique d'une "queue de fusée" et à un dispositif de chauffage en flux transvere.

FORMULATIONS

La modélisation de la physique du chauffage par induction fait intervenir à la fois les équations de la magnétodynamique et de la thermique; il s'agit en effet de déterminer le champ magnétique créé par l'inducteur dans l'espace environnant, d'en déduire les courants induits et la puissance locale dissipée par effet Joule dans la pièce conductrice à chauffer, puis d'effectuer un calcul de température en utilisant cette puissance dissipée comme source thermique.

Les équations de la magnétodynamique sont issues des équations de Maxwell, et des lois constitutives des matériaux. L'équation de diffusion de la chaleur est régi par la loi de Fourier. Ces équations s'écrivent dans le cas de la formulation A-V pour le problème magnétodynamique, de la façon suivante [3] :

$$\begin{cases} \vec{rot}\left(\nu_r \, \vec{rot}\,\vec{A}\right) - \vec{grad}\left(\nu_p \mathrm{div}\,\vec{A}\right) + j\mu_0\sigma\omega\,\vec{A} + \mu_0\sigma\,\vec{grad}\,V = \vec{J} \\ \mathrm{div}\,\sigma\left(j\omega\,\vec{A} + \vec{grad}\,V\right) = 0 \end{cases}$$

$$\rho\,Cp\,\frac{\partial T}{\partial t} + \mathrm{div}\left(-k\,\vec{grad}\,T\right) = Qth$$

avec aux interfaces : $-k\,\vec{grad}\,T\,.\,\vec{n} = h\left(T - T_{amb}\right) + \sigma_s\,\varepsilon\left(T^4 - T_{amb}^4\right)$

Les équations globales se présentent donc sous la forme d'un système transitoire, non linéaire, qui dans le cas général 3D possède 4 inconnues complexes pour la partie magnétodynamique et une inconnue réelle pour la partie thermique.

Nous verrons dans les deux paragraphes suivants les hypothèses simplificatrices (d'ordre géométrique) ou les modifications de la formulation à effectuer en vue de réduire le temps de calcul.

SIMULATIONS PSEUDO-3D - COURANTS MIXTES

Lorsque les pièces à chauffer présentent une symétrie de révolution, il arrive fréquemment que le procédé de chauffe consiste à faire tourner la pièce dans un inducteur, de façon à homogénéiser le champ de température sur tout le pourtour. Dans une telle configuration l'hypothèse de modélisation axisymétrique est séduisante, puisqu'elle suppose que l'inconnue est invariante par rotation, et prend donc en compte implicitement l'hypothèse d'homogénéité de la température due à la rotation. Cependant, l'inducteur ne présente pas en général de symétrie de révolution.

Pour pouvoir appliquer l'hypothèse axisymétrique, une idée consiste à utiliser le principe de superposition des grandeurs électromagnétiques, c'est-à-dire ajouter les puissances instantanées créées dans la pièce, dans chacune des géométries en coupe axisymétrique différentes, du point de vue de l'inducteur. Dans les différentes configurations géométriques, les courants sont soit perpendiculaires soit parallèles au plan de résolution. Dans le cas d'un courant perpendiculaire la formulation se réduit classiquement, à une seule composante, suivant la même direction que celle du courant. Dans le cas d'un courant situé dans le plan de résolution, on utilisera une formulation en potentiel vecteur modifié (ou en A-v si on souhaite alimenté le système en tension) qui se réduit à 2 composantes (A^*_{xc}, A^*_{yc}) situées dans le plan des courants.

Les calculs magnétodynamiques sont donc effectués de façon séparée, puis une moyenne des différentes pertes Joule obtenues sur chacune des différentes géométries est ensuite réinjectée comme terme source dans l'équation thermique. Cette moyenne est la moyenne arithmétique pondérée par des coefficients correspondant à la fraction angulaire pendant laquelle chacune des géométries est "vue" par la charge figure 1).

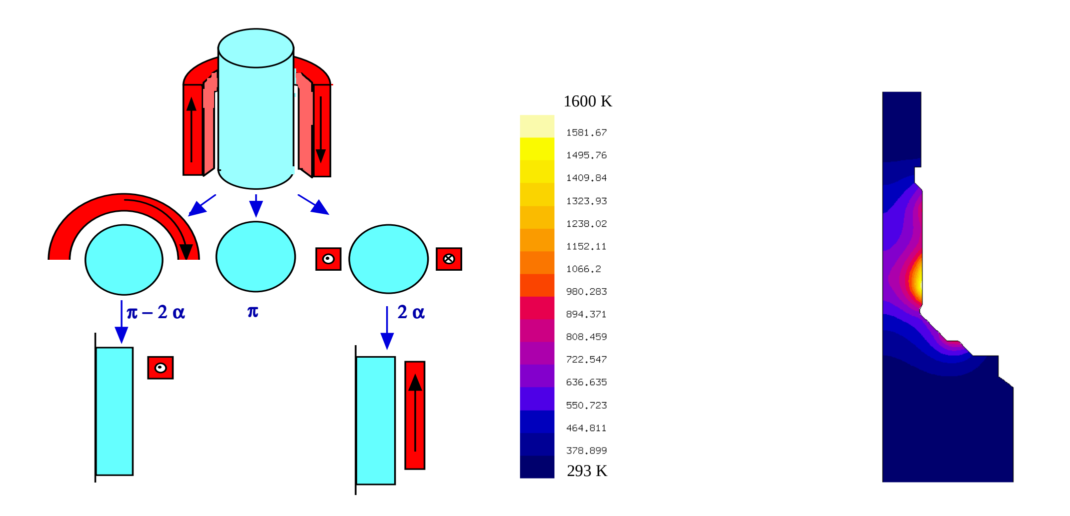
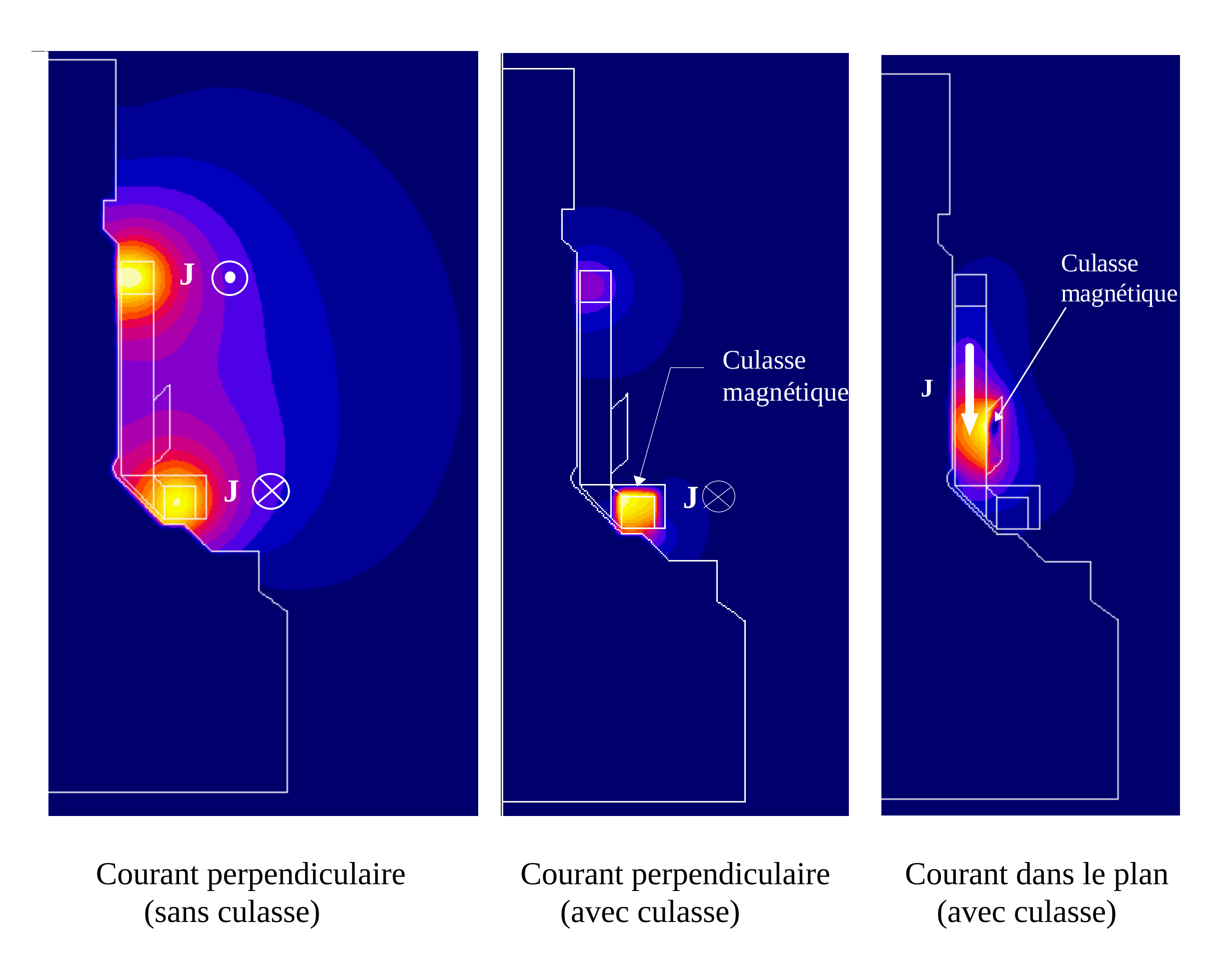


Figure 1 : Courants mixtes

Figure 3 : Isothermes - Queue de fusée (pour t=3,0s)



Courant perpendiculaire (sans culasse)

Courant perpendiculaire (avec culasse)

Courant dans le plan (avec culasse)

Figure 2 : Module du potentiel vecteur dans les 3 trois configurations retenues
Simulation pseudo-3D - Queue de fusée

Dans cette méthodologie le système couplé est résolu en couplage “faible”, c’est-à-dire de façon séquentielle : magnétodynamique (figure 2), puis thermique (figure 3), et ce à chaque pas de temps thermique.
Cette méthodologie permet de réduire de façon conséquente la taille des systèmes à résoudre par rapport à une approche 3D complète.

SIMULATION 3D

Dans le cadre de la méthode des éléments finis nodaux les formulations les plus utilisées, sont les formulations en quadri-vecteurs (A-V ou A-v) et la formulation en potentiel vecteur modifié.
La formulation magnétodynamique en potentiel vecteur modifié $\underline{A}$* permet de supprimer le potentiel scalaire des équations, en effectuant le changement de variable suivant :

$$j\sigma\omega\underline{A}^{*} = j\,\sigma\omega\underline{A} + \sigma.\overrightarrow{\mathrm{grad}}\underline{V}$$

La formulation n'a plus dans ce cas que 3 inconnues complexes et s'écrit :

$$\overrightarrow{\mathrm{rot}}\nu\overrightarrow{\mathrm{rot}}\underline{A}^{*} - \nu_{p}\overrightarrow{\mathrm{grad}}\,\mathrm{div}\,\underline{A}^{*} + j\,\sigma\omega\underline{A}^{*} = \underline{J}$$

Dans ces 2 formulations, apparaît la jauge de Coulomb (div$\underline{A}$) permettant d'assurer par une technique de pénalité l'unicité de la solution. Le coefficient de pénalité ν_p est à régler avec prudence, car il permet dans le cas de la formulation en potentiel vecteur modifié, de vérifier la non divergence de la densité de courant dans le volume.

Nous nous intéresserons plus particulièrement à un procédé de réchauffage de brame d'acier par un dispositif de chauffage en flux pseudo-transverse. En effet entre deux étapes de laminage, les brames sont stockées sur une table d'attente. Du fait de la longueur des brames, il se produit un refroidissement de celles-ci. Il apparait un gradient thermique important entre les deux extrémités, qui implique en final une inhomogénéité métallurgique du produit. Pour cette raison, il est souhaitable de réchauffer la pièce entre les deux trains de laminage. Le chauffage par induction apparaît comme une technique appropriée pour réaliser cette homogénéisation en température, sans brûler les rives de brame. C'est également une technique très souple d'utilisation.
Le dispositif étudié est du type chauffage en flux pseudo-tranverse. En effet l'inducteur vue en coupe (Figure 4) est composé de 4 groupes de trois conducteurs multicouches, alimentés de façon croisée en opposition de phase. La brame conductrice défile dans l'entrefer à une vitesse constante de 1m/s.

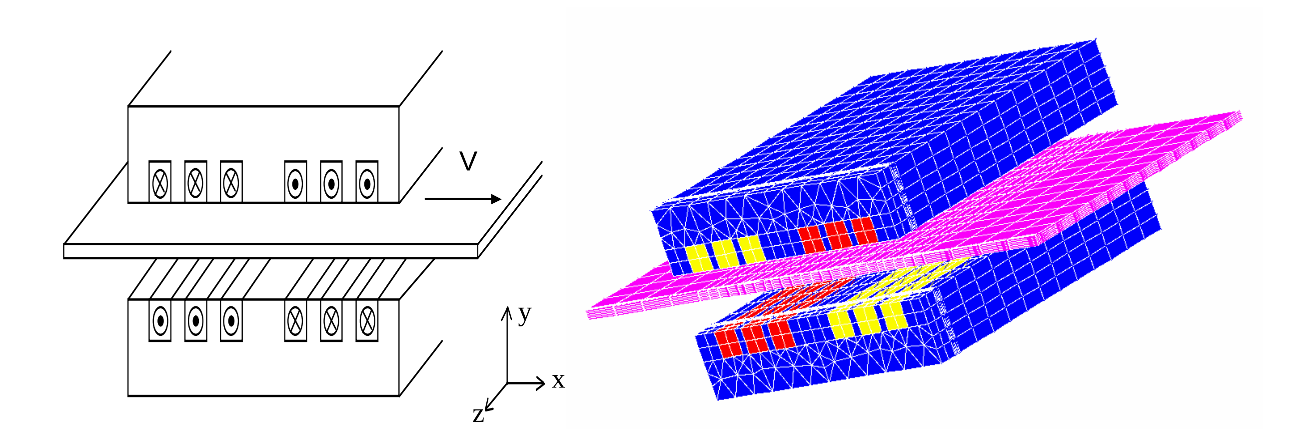


Figure 4 :Géométrie du problème

Figure 5 : Maillage de la géométrie

Plutôt que de résoudre l'équation de diffusion de la chaleur dans le repère fixe (repère Eulérien), celle-ci sera écrite dans le repère mobile (2) lié à la brame (repère Lagrangien), ce qui permet d'éviter les problèmes d'instabilités numériques liés au nombre de Péclet

important.La source constituée par les pertes Joule doit alors être déplacée à chaque pas de temps dans ce repère. La solution adoptée, plus simple, consiste à déplacer le maillage de la brame par rapport à la source maintenue fixe. La source interne est ainsi réinterpolée à chaque pas sur les mêmes coordonnées, mais celles-ci correspondent à une localisation différente des points.

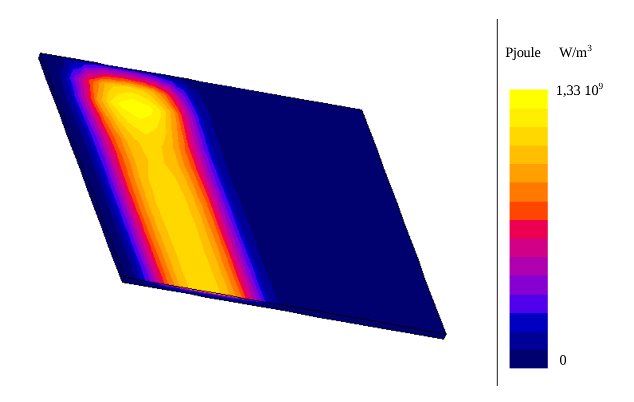


Fig.3: Répartition des pertes Joule dans la brame à un instant donné

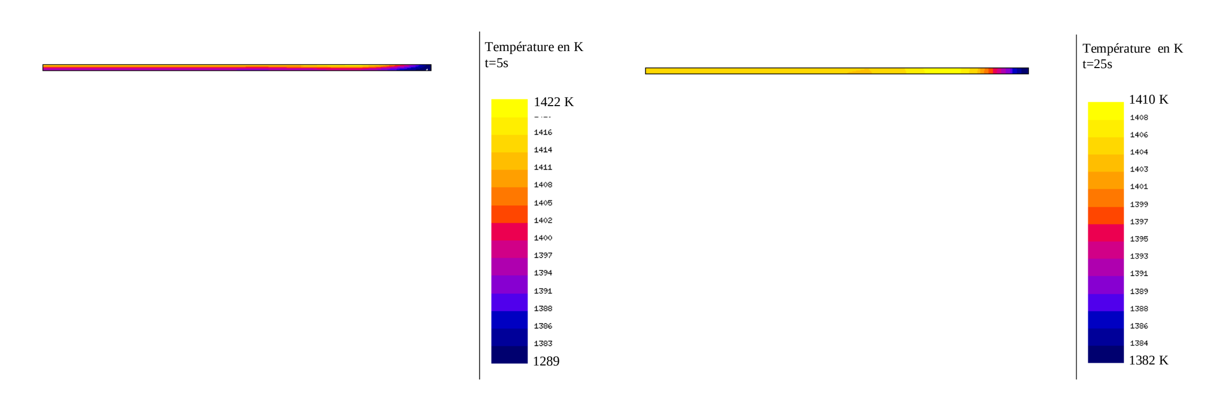


Figure 4 : Isothermes en section de brame pour t=5s et 25s

BIBLIOGRAPHIE

[1] P. Masse : “FLUX-EXPERT : un système d’aide à la construction de logiciels” Thèse de Doctorat d’Etat, Grenoble, 1983

[2] S. Wanser and al. : “Computation of 3D induction hardening problems by combined finite and boundary element methods” COMPUMAG - November 1993

[3] O. Biro and K. Preis : “On the use of the magnetic vector potential in finite element analysis of three-dimensional eddy currents”, IEEE Trans. on Magn., vol. 25, N° 4, July 1989